ChinaXiv合作期刊

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2018.05.05

天山南侧喀什地区冰雹潜势预报及预警指标的研究①

王 昀[1]， 卢品睿[2]， 王 旭[3]

（1 兰州大学大气科学学院，甘肃 兰州 730001； 2 张掖市气象台，甘肃 张掖 734002；
3 新疆维吾尔自治区人工影响天气办公室，新疆 乌鲁木齐 830002）

摘 要：利用2008—2017年5～8月天山南侧喀什地区气象台站观测记录、人工防雹作业点记录、灾害调查等资料，喀什探空站08时、20时探空资料，喀什雷达探测资料及其基数据反演产品，对冰雹的年分布、月分布及日变化特征进行了分析，归纳出冰雹云的雷达回波特征及移动路径，依据百分位数方法确定了以0 ℃层高度、-20 ℃层高度、冻结层厚度、全总指数、杰弗逊指数、K指数、沙氏指数为代表的冰雹预报指标，以及以回波顶高及其与当日0 ℃层高度差、40～50 dBZ回波高度及其与当日0 ℃层高度差、组合反射率、垂直积分液态水含量为代表的雷达特征预警指标。

关 键 词： 回波顶高；垂直累积液态水含量；组合反射率；移动路径；预警指标

中图分类号： P458.1.1 **文献标识码：**A **文章编号：**

冰雹是比较激烈的中小尺度天气现象之一，来势猛烈、强度大，往往给当地的农牧业生产造成严重损失。新疆是中国冰雹高发区之一，冰雹灾害损失一直高居气象灾害前三位，甚至首位。天山南侧的背风坡地带是新疆冰雹的多发区，尤其是喀什地区，2010—2017年平均每年因雹灾损失2.4×10^8元、受灾农田1.6×10^4 hm^2，雹灾最重的2013年经济损失更是超过5.5×10^8元。目前人工防雹作业是能有效防御冰雹灾害、减少灾害损失的唯一途径，研究表明科学开展人工防雹作业后比之前平均年受灾率降低了11个百分点，年冰雹灾害对农业产值造成的损失比例减小了3个百分点[1]。充分利用探空资料、雷达资料实时、有效的识别雹云是进行人工防雹作业的前提和基础，尤其是新一代多普勒雷达的普遍应用为冰雹云的识别研究开拓了新天地。

早在20世纪70年代初，国外学者就提出了利用回波反射率、回波顶高度等雷达特征识别和预测降雹回波的方法[2-3]，但是即使雷达探测反射率因子达到55 dBZ也经常在地面观测不到冰雹，单独降雨也可能达到这种幅度的反射率[4]。为了提高识别能力和水平，垂直累积液态水含量等雷达参量被用于检测和诊断冰雹云的方法中[5-6]。近年来提出的以垂直累积液态含水量、最大反射率因子等雷达参量为变量的判别分析模型[7]，Waldvogel方法[8-9]等算法具有较高的判识能力，是检测冰雹云比较准确的方法。

国内学者也根据降雹资料及相应的雷达探测资料，分析了云南、福建、广西、安徽、山西、甘肃等地冰雹云开始降雹时的回波强度、强回波核高度、回波顶高、垂直积分液态含水量等特征量，给出了判断冰雹是否出现的阈值，总结出冰雹的雷达特征预警指标[10-16]。支竣等[17]通过整理分析2009—2012年喀什18次冰雹天气过程雷达监测资料，归纳出了喀什西部冰雹预警指标。王昀等[18]利用2005—2016年5～8月气象台站观测记录、探空资料和雷达探测等资料，依据百分位数方法确定了天山北侧奎玛流域成灾雹云的预报及雷达特征预警指标并进行了检验分析。

天山南侧的喀什地区虽然气象观测站年平均降雹日数不足1 d，但实际上冰雹多发生在测站以外，每年都有多次不同程度的局部雹灾，尤其是伽师等地，一旦发生雹灾，损失相当严重[19]。

本文通过对2008—2017年间5～8月喀什地区新一代天气雷达探测资料及气象观测等资料的分

① **收稿日期：**2018-04-15； **修订日期：**2018-07-22
基金项目：公益性行业（气象）科研专项经费项目（GYHY201306047）资助
作者简介：王昀（1990-），女，河南洛阳人，博士研究生，主要从事极端天气与气象灾害研究. E-mail：yunwang@vip.163.com
通讯作者：王旭（1964-），男，河南洛阳人，北京大学硕士，研究员，主要从事人工影响天气研究. E-mail：wangxu2323@vip.163.com

chinaXiv:201810.00150v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:201810.00150v1

析,给出了天山南侧喀什地区近 10 a 来冰雹的气候变化特征以及冰雹云的移动路径,依据百分位数方法确定了冰雹云的预报及雷达特征预警指标,为人工防雹消雹提供有价值的参考依据。

1 研究区概况

天山山脉横亘新疆中部,天山南脉向西南伸展,形成了新疆的西部屏障。喀什地区地处天山南脉背风坡,背依天山,东临广袤浩瀚的塔克拉玛干沙漠,独特的地形地貌使这一地区成为冰雹的高发区。随着新疆区域经济的快速发展,农业、种植业和特色林果业规模日渐壮大,喀什地区已成为新疆重要的粮食生产基地和优质果品基地。冰雹轻则影响农作物的生长、林果的品质和产量,重则导致大面积农作物及林果绝收,近年来因冰雹所造成的经济损失更是动则上亿,冰雹灾害已成为制约该区域经济发展的主要因素之一。

防御冰雹灾害,就必须深入研究冰雹天气发展演变时更全面的信息,从而准确、及时、有效的指挥人工防雹作业,减少减轻经济损失。新一代多普勒天气雷达探测资料的应用研究,为冰雹云识别及冰雹预警打开了新途径,对防御冰雹灾害、科学进行人工防雹作业指挥、保障社会和经济发展具有重要的意义。

2 资料与方法

利用 2008—2017 年 5 ~ 8 月喀什地区气象台站观测记录、人工防雹作业点记录、灾害调查等资料,对期间发生的冰雹过程进行普查分析,共得到 33 例损失程度大于 30%、受灾面积大于 66.67 hm^2 且雷达各项技术参数正常、强度值稳定、分析资料连续完整的冰雹过程。在此基础上,对冰雹的气候特征进行了分析,依据雷达回波特征绘制出冰雹云的移动路径,对冰雹云的回波顶高,40、45、50 dBZ 回波高度,最大回波强度,组合反射率及垂直积分液态水含量等雷达特征进行了分析。

利用喀什气象站 08 时、20 时探空资料,对包含 33 次冰雹过程的 26 个降雹日(其中有 5 个降雹日每日包含 2 次降雹过程,1 个降雹日包含 3 次降雹过程)的特征层高度、不稳定参数、能量条件等进行统计分析,确定冰雹潜势预报指标。

对 33 次冰雹过程中降雹前 30 min(5 个雷达体扫)、15 min(3 个雷达体扫)冰雹云的雷达探测资料进行分析,根据回波顶高(ET)及其与当日 0 ℃层高度差(ΔHET),40、45、50 dBZ 回波高度(H_{40}、H_{45}、H_{50})及其与当日 0 ℃层高度差(ΔH_{40}、ΔH_{45}、ΔH_{50}),组合反射率(CR)、垂直积分液态水含量(VIL)等雷达特征建立冰雹的预警指标。

在确定成灾雹云潜势预报指标和雷达特征预警指标时,用到了百分位数方法,它是确定指标参考值范围的优良方法。百分位数是用于反映顺序数据集中趋势的一种统计测度值,是指用 99 个点将一组顺序数据 100 等分后各分位点上的值[20]。百分位数是一种位置指标,以 P_r 表示,一个百分位数将总体或样本的全部观测值分为两部分,理论上有 $r\%$ 的观测值比它小,有 $(100-r)\%$ 的观测值比它大,故百分位数是一个界值。

对样本数为 N 的样本数据按由小到大顺序排列好后,则第 r 百分位数 P_r 的计算公式如下[21]:

$$P_r = X_{[d]} + (X_{[d+1]} - X_{[d]})(d - [d]),$$

$$d = 1 + (N-1)r\%$$

式中:d 表示百分位数 P_r 所在位次;$[d]$表示取 d 的整数部分;$X_{[d]}$、$X_{[d+1]}$分别表示位次为$[d]$、$[d+1]$上的数据。

3 冰雹的气候特征及移动路径

2008—2017 年喀什地区出现 33 次较强冰雹过程,几乎每年都有冰雹出现,平均每年 3 d,最多的 2013 年有 6 d,2008 和 2009 年只有 1 d。降雹集中出现在 5 ~ 8 月,6 月最多,5 月次之,7 月最少。降雹在傍晚至午夜有一个高发时段,以20时(北京

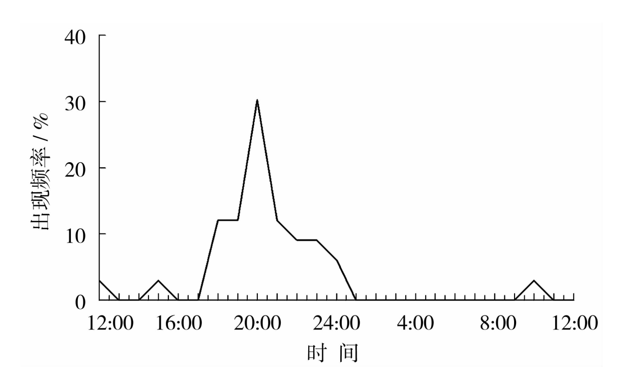


图 1 2008—2017 年 5 ~ 8 月冰雹出现频率日变化

Fig. 1 Percentage variation of daily of hail from May to August during 2008—2017

ChinaXiv合作期刊

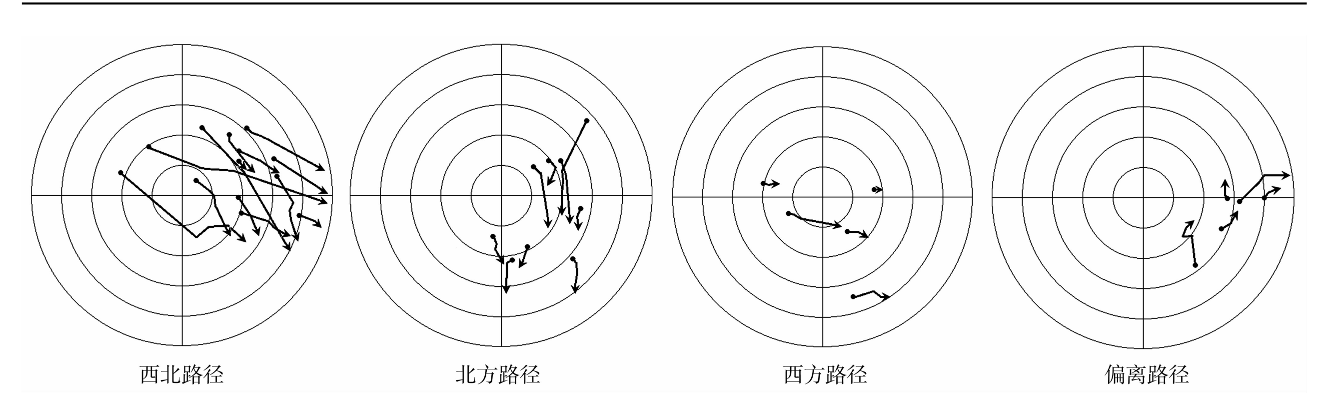


图 2　2008—2017 年 5 ~ 8 月冰雹云移动轨迹

Fig. 2　Moving trajectory of hail cloud during 2008—2017

时)最多,午夜过后直至中午鲜少出现。

依据雷达探测资料,对 33 例冰雹云进行追踪,绘制出移动路径图(图 2)。喀什地区冰雹云可归纳出四条主要路径:(1)西北路径,发生概率为 39%,54% 起源天山南侧浅山区,46% 起源于喀什东部平原地区,出现在 6 ~ 8 月。(2)北方路径,发生概率为 27%,44% 起源天山南侧浅山区,56% 起源于喀什东部平原地区,出现在 5 月、6 月和 8 月。(3)西方路径,发生概率为 15%,40% 起源天山南侧浅山区,60% 起源于喀什东部平原地区,出现在 5 ~ 7 月。(4)偏南路径,发生概率为 15%,起源于喀什东部平原地区,出现在 5 ~ 6 月。虽然有 48% 的冰雹云起源于天山南侧浅山区,还有 52% 的冰雹云起源于喀什东部平原地区,这里处于天山南侧背风坡 200 km 范围内,正是气流过山时产生背风波、触发对流云的有利地区。

喀什地区冰雹云的移动路径有着明显的季节性,在暮春 5 月以北方路径为主,占 50%,偏南路径次之,西方路径最少,西北路径没有出现。夏季 6 ~ 8 月以西北路径为主,占 57%,尤其是盛夏 7 月和 8 月占 75% 以上,盛夏没有出现偏南路径。

与天山北侧冰雹云不同,喀什地区冰雹云在降雹前半小时内移动距离非常短,几乎不动,有 54% 的冰雹云从初始对流生成到降雹结束移动距离不超过 50 km。

4　冰雹的潜势预报指标

根据 2008—2017 年 5 ~ 8 月包含 33 次冰雹过程的 26 个降雹日喀什站 08 时、20 时探空资料,对 0 ℃层高度(H_0)、-20 ℃层高度(H_{-20})、冻结层厚度(ΔH_{-20})、全总指数(TT)[22]、杰弗逊指数(JI)[23-24]、K 指数(K)[25]、沙氏指数(SI)[26]、A 指数(A)及对流有效位能($CAPE$)[27-28]进行统计分析(表 1、表 2),以期能够找出对喀什地区冰雹天气有一定参考价值和指示意义的预报指标。

由表 1 可以看出,08 时 H_0 在 3.4 ~ 4.9 km、平均 4.2 km,H_{-20} 在 6.3 ~ 8.3 km、平均 7.0 km,这两项特征层高度均在最有利于雹云降雹的范围内[29],且都是 5 ~ 7 月逐月增高,8 月有所回落;ΔH_{-20} 在 2.4 ~ 3.5 km、平均 2.8 km,5 ~ 8 月逐月增高。TT 在 39 ~ 53 ℃之间,平均 48 ℃;JI 在 92 ~ 186 ℃之间,平均 133 ℃;K 在 17 ~ 38 ℃之间,平均 26 ℃;SI 在 -2.1 ~ 4.6 ℃之间,平均 0.6 ℃。在天山南侧,26 个降雹日有 13 d $A \leqslant 0$,占比 50%,最小 A 值为 -33 ℃,对冰雹的预报指示意义不明显;仅有 3 个降雹日 $CAPE > 100$ J·kg^{-1},有 68% 的降雹日 $CAPE \leqslant 10$ J·kg^{-1},因此在 08 时 $CAPE$ 只能作为判断冰雹天气是否发生的参考依据,不能作为有效的预报指标。

表 2 给出了 20 时各特征层高度、不稳定参数、对流有效位能的值,5 ~ 8 月平均值同 08 时相比,H_0 变化幅度 ≤160 m,H_{-20}、ΔH_{-20} 变化幅度 ≤90 m,TT、K、SI 变化幅度≤1 ℃,JI 变化幅度≤41 ℃,可见特征层高度、不稳定参数在降雹日具有稳定的指示意义,是不错的预报指标。值得关注的是,由于喀什地区 70% 的降雹发生在 19:30 以后,20 时的 $CAPE$ 月平均值都在 250 J·kg^{-1}以上,可见 $CAPE$ 能够反映临近降雹时大气环境的能量状况,但由实测探空计算的 $CAPE$ 值并不适合做预报指标。

综上所述,可以将 08 时 H_0、H_{-20}、ΔH_{-20}、TT、JI、K、SI 作为冰雹的潜势预报指标。利用百分位数方法,表 3 给出了 H_0、H_{-20}、ΔH_{-20}、SI 指数当 r 取值

chinaXiv:201810.00150v1

ChinaXiv合作期刊

表 1　降雹日 08 时特征层高度和不稳定参量

Tab. 1　Height of 0 ℃, the height of −20 ℃, altitude difference between 0 ℃ and −20 ℃, *TT* index, *JI* index, *K* index, *SI* index, *A* index, *CAPE* of hail daily at 08:00

月	H_0/ m	H_{-20}/ m	ΔH_{-20}/ m	*TT* / ℃	*JI* / ℃	*K* / ℃	*SI* / ℃	*A* / ℃	*CAPE* / J·kg^{-1}
5	3 768	6 501	2 733	49	111.8	24	0.8	3.7	0.9
6	4 266	7 022	2 756	47	138.7	24	1.0	-10.0	56.4
7	4 609	7 507	2 898	47	156.6	27	0.7	1.8	29.2
8	4 471	7 456	2 985	49	135.7	32	-0.6	1.2	91.5
5~8 月平均	4 222	7 041	2 818	48	133.4	26	0.6	-2.0	43.5

表 2　降雹日 20 时特征层高度和不稳定参量

Tab. 2　Height of 0 ℃, the height of −20 ℃, altitude difference between 0 ℃ and −20 ℃, *TT* index, *JI* index, *K* index, *SI* index, *A* index, *CAPE* of hail daily at 20:00

月	H_0/ m	H_{-20}/ m	ΔH_{-20}/ m	*TT* / ℃	*JI* / ℃	*K* / ℃	*SI* / ℃	*A* / ℃	*CAPE* / J·kg^{-1}
5	3 987	6 582	2 595	50	151.6	23	0.0	-6.0	270.6
6	4 456	7 129	2 672	47	183.9	23	1.5	-10.7	297.6
7	4 589	7 685	3 096	51	188.1	35	-1.2	4.5	285.4
8	4 602	7 422	2 820	49	177.3	29	-0.2	-4.0	579.7
5~8 月平均	4 375	7 123	2 748	49	174.2	26	0.3	-5.6	344.5

表 3　冰雹潜势预报指标

Tab. 3　Potential forcasting indicators of hail

月	H_0/ m	H_{-20}/ m	ΔH_{-20}/ m	*TT* / ℃	*JI* / ℃	*K* / ℃	*SI* / ℃
5	3 949	6 697	2 885	46	94.4	21	2.3
6	4 425	7 313	2 872	46	124.6	19	1.7
7	4 718	7 614	2 926	45	146.0	22	2.2
8	4 612	7 569	3 076	48	123.7	31	0.2
5~8 月平均	4 551	7 454	2 967	46	114.0	21	1.8

80 时，*TT*、*JI*、*K* 指数当 *r* 取值 20 时，这 7 个参数 5~8 月平均及各月的预报指标。在 5~8 月，当 $H_0 \leq 4.6$ km、$H_{-20} \leq 7.5$ km、$\Delta H_{-20} \leq 3.0$ km、$TT \geq 46$ ℃、$JI \geq 114.0$ ℃、$K \geq 21$ ℃、$SI \leq 1.8$℃时，就可预报当日有强冰雹出现。

由表 3 可以看出，H_0、H_{-20}、*JI* 这 3 个冰雹潜势预报指标在暮春 5 月与夏季 6~8 月相差很大，5 月 H_0 低于 4.0 km、H_{-20} 低于 6.7 km、*JI* 低于 95 ℃，而在 6~8 月 H_0 升至 4.4 km 以上、H_{-20} 超过 7.3 km、*JI* 超过 123 ℃。

同天山北侧相比[18]，喀什地区冰雹潜势预报指标中的 H_0、H_{-20} 明显偏高 0.4~1.0 km，这主要是因为两地探空站海拔高度相差 900 m 造成的。ΔH_{-20} 在喀什地区比天山北侧偏薄百米以上，逐月增加的变化与天山北侧刚好相反。与天山北侧相比，喀什地区预报指标 *SI* 的变化幅度明显缩小，其指示意义更加明显。

5　冰雹的预警指标

5.1　降雹时冰雹云的雷达产品特征

表 4 给出了 5~8 月降雹时冰雹云的回波顶高(*ET*)，40、45、50 dBZ 回波高度(H_{40}、H_{45}、H_{50})，回波顶高与当日 0 ℃层高度差(ΔHET)，40、45、50 dBZ 回波高度与当日 0 ℃层高度差(ΔH_{40}、ΔH_{45}、ΔH_{50})，组合反射率(*CR*)及垂直积分液态水含量(*VIL*)的月平均值。可以看出，降雹时冰雹云雷达特征值在 7 月较低，5、6 月较高，可见对流活动在春末夏初更为活跃，云体发展更为高大强盛。

5~8 月降雹时冰雹云 *ET* 在 9.1~16.2 km 之间，平均 13.7 km，只有 1 例不足 10 km，其余均在 12 km 以上。H_{40} 在 7.2~16.0 km 之间，平均 11.1 km，82% 超过 10 km。H_{45} 在 6.5~15.9 km 之间，平均

ChinaXiv合作期刊

10.2 km,85% 超过 9 km。H_{50} 在 5.2 ~ 15.7 km 之间,平均 9.1 km,82% 超过 6 km。ΔET 在 5.4 ~ 12.4 km 之间,平均 9.3 km;ΔH_{40} 在 3.6 ~ 11.8 km 之间,平均 6.8 km;ΔH_{45} 在 2.8 ~ 11.7 km 之间,平均 5.9 km;ΔH_{50} 在 0.8 ~ 11.5 km 之间,平均 4.8 km。CR 在 50 ~ 70 dBZ,平均 59 dBZ,55% 大于 60 dBZ。VIL 在 7 ~ 104 kg · m^{-2},平均 33 kg · m^{-2},85% 大于 15 kg · m^{-2}。

与天山北侧冰雹云不同,喀什地区冰雹云云体更为高大,月平均 ET 偏高 2 ~ 6 km,H_{40} 偏高 1 ~ 5 km,H_{45} 偏高 1 ~ 4.5 km,H_{50} 偏高 1 ~ 4 km。喀什地区冰雹云云体更为强盛,VIL 更大,CR 偏强 3 ~ 6 dBZ,VIL 偏大 4 ~ 21 kg · m^{-2}。

雷达探测的径向速度场中,负径向速度代表入流,正径向速度代表出流,“逆风区”是在同一方向的速度区中出现相反方向的速度区,即在正(负)速度区内,出现了负(正)速度区,而被包围的速度区便称为“逆风区”[30],它的一边为辐合区,另一边为辐散区,形成了产生对流的垂直环流结构[31]。逆风区多出现于 5 ~ 9 月的强对流天气,平均厚度 4.7 km[32]。逆风区也是强对流天气的判据,有逆风区的存在基本上都伴有剧烈的天气过程,只要逆风区的结构一直存在,强回波的反射率因子就不会减弱[33-34],在其发展范围内及其移动路径上,往往会出现强降水等剧烈天气现象[35-36]。

在径向速度图中,天山南侧 33 例冰雹云中有 23 例降雹时回波强中心出现了闭合的零速度线区(逆风区),厚度在 0.8 ~ 4 km,平均 2.7 km;还有 7 例出现了气旋式辐合,辐合顶高在 6 ~ 9 km。

5.2　冰雹云雷达产品特征的预警指标

对 33 例冰雹云降雹前 15 min(降雹前 3 个雷达体扫)、30 min(降雹前 5 个雷达体扫)雷达探测资料进行分析,依据百分位数方法,根据 ET、H_{40}、H_{45}、H_{50}、ΔHET、ΔH_{40}、ΔH_{45}、ΔH_{50}、CR、VIL 等雷达产品特征建立预警指标,使冰雹云的识别至少提前 15 ~ 30 min,为人工防雹作业争取宝贵时间。

降雹前 15 min,冰雹云 ET 最低 11 km,平均高度 13.6 km;H_{40} 最低 7.5 km,平均 10.7 km;H_{45} 最低 5.2 km,平均 9.6 km;H_{50} 最低 3.2 km,平均 8.7 km。ΔHET 最低 6.4 km,平均 9.3 km;ΔH_{40} 最低 2.9 km,平均 6.4 km;ΔH_{45} 最低 1.1 km,平均 5.2 km;ΔH_{50} 最低 -1.3 km,平均 4.3 km。CR 最小 46 dBZ,平均 58 dBZ;VIL 最小 3 kg · m^{-2},平均 28 kg · m^{-2}。在 33 次降雹过程中,有 4 例降雹前 15 min 冰雹云没有出现 50 dBZ 的雷达回波,占比 12 %。在径向速度图中,有 17 例冰雹云在降雹前 15 min 回波强中心出现了逆风区,厚度在 0.2 ~ 4.5 km;还有 10 例出现了气旋式辐合,辐合顶高在 5 ~ 9 km。

利用百分位数方法,表 5 给出了当 r 取值 20 时降雹前 15 min 的雷达特征预警指标。5 ~ 8 月在降雹前 15 min,雷达特征预警指标是 $ET \geqslant 12.2$ km,H_{40}、H_{45}、H_{50} 分别大于 9.4 km、8.6 km、7.8 km;$\Delta HET \geqslant 7.7$ km,ΔH_{40}、ΔH_{45}、ΔH_{50} 分别大于 4.9 km、4.0 km、3.4 km;$CR \geqslant 53$ dBZ,$VIL \geqslant 13$ kg · m^{-2},逆风区厚度大于 1.8 km。

降雹前 30 min,冰雹云 ET 最低 10 km,平均高

表 4　冰雹云雷达产品特征量月平均值

Tab. 4　Monthly average echo characteristics of hail cloud

月	ET / m	H_{40}/ m	H_{45}/ m	H_{50}/ m	ΔHET / m	ΔH_{40}/ km	ΔH_{45}/ m	ΔH_{50}/ m	CR / dBZ	VIL / kg · m^{-2}
5	14 080	11 514	10 118	8 635	10 137	7 571	6 175	4 692	58	27
6	13 681	11 314	10 468	9 748	9 277	6 910	6 064	5 344	60	38
7	12 790	9 635	9 045	8 200	8 201	5 046	4 456	3 611	58	21
8	13 663	11 320	10 708	9 097	9 012	6 668	6 031	4 445	60	41

表 5　降雹前 15 min 冰雹云雷达特征预警指标

Tab. 5　Nowcasting indicators of radar 15 min before hails

月	ET / m	H_{40}/ m	H_{45}/ m	H_{50}/ m	ΔHET / m	ΔH_{40}/ m	ΔH_{45}/ m	ΔH_{50}/ m	CR / dBZ	VIL / kg · m^{-2}
5	12 968	10 006	8 252	7 870	9 041	5 999	4 494	3 980	49	9
6	12 250	9 400	9 000	7 750	7 623	4 773	4 473	3 424	56	15
7	11 530	9 210	7 750	6 998	7 035	4 669	3 255	2 503	56	14
8	13 076	9 286	8 798	8 400	8 345	5 039	4 551	4 091	55	18
5 ~ 8 月平均	12 210	9 400	8 598	7 750	7 726	4 908	4 024	3 359	53	13

chinaXiv:201810.00150v1

ChinaXiv合作期刊

表 6　降雹前 30 min 冰雹云雷达特征预警指标

Tab. 6　Nowcasting indicators of radar 30 min before hails

月	ET / m	H_{40}/ m	H_{45}/ m	H_{50}/ m	ΔHET / m	ΔH_{40}/ m	ΔH_{45}/ m	ΔH_{50}/ m	CR / dBZ	VIL / kg · m^{-2}
5	12 712	8 982	8 548	7 370	8 785	4 771	4 537	2 945	45	4
6	12 830	10 014	8 850	8 372	8 206	5 477	4 223	3 813	53	16
7	11 200	9 630	7 700	6 400	6 705	5 077	3 051	1 750	48	8
8	12 820	10 626	8 628	8 950	8 089	5 921	4 381	4 576	52	11
5 ~ 8 月平均	12 260	9 620	8 114	7 274	7 808	5 063	3 529	2 673	47	7

度 13.4 km；H_{40}最低 6.2 km，平均 10.8 km；H_{45}最低 6.5 km，平均 9.8 km；H_{50}最低 2.6 km，平均 8.8 km。ΔHET 最低 6.2 km，平均 9.1 km；ΔH_{40}最低2.1 km，平均 6.5 km；ΔH_{45}最低 1.9 km，平均 5.4 km；ΔH_{50}最低 -1.9 km，平均 4.5 km。CR 最小 43 dBZ，平均 56 dBZ；VIL 最小 3 kg · m^{-2}，平均 24 kg · m^{-2}。在 33 次降雹过程中，有 6 例降雹前 30 min 冰雹云没有出现 50 dBZ 的雷达回波，占比 18%。在径向速度图中，有 16 例冰雹云在降雹前 30 min 回波强中心出现了逆风区，厚度在1 ~ 4 km；还有 9 例出现了气旋式辐合，辐合顶高在 4 ~ 9.5 km。

利用百分位数方法，表 6 给出了当 r 取值 20 时降雹前 30 min 的雷达特征预警指标。5 ~ 8 月在降雹前 30 min，雷达特征预警指标是 $ET \geqslant 12.3$ km，H_{40}、H_{45}、H_{50} 分别大于 9.6 km、8.1 km、7.3 km；$\Delta HET \geqslant 7.8$ km，ΔH_{40}、ΔH_{45}、ΔH_{50}分别大于 5.1 km、3.5 km、2.7 km；$CR \geqslant 47$ dBZ，$VIL \geqslant 7$ kg · m^{-2}，逆风区厚度大于 1.5 km。

6　结 果

本文利用 2008—2017 年 5 ~ 8 月天山南侧喀什地区气象台站观测记录、人工防雹作业点记录、灾害调查等资料，喀什探空站 08 时、20 时探空资料，喀什雷达探测资料及其基数据反演产品，对冰雹的年分布、月分布及日变化特征进行了分析，归纳出冰雹云的雷达回波特征及移动路径，依据百分位数方法确定了冰雹的预报及雷达特征预警指标。

（1）10 a 来每年均有冰雹出现，平均每年 3 d；冰雹集中在 5 ~ 8 月，6 月最多、7 月较少；降雹时段以傍晚至午夜 18 ~ 24 时多发，20 时最多，午夜过后直至中午鲜少出现。

（2）冰雹云主要移动路径有四条：西北路径、北方路径、西方路径和偏南路径，有一半的冰雹云起源于天山南侧浅山区，还有另一半起源于喀什东部平原地区。

（3）在 5 ~ 8 月，喀什探空站特征层高度、不稳定参数在降雹日具有稳定的指示意义，是不错的预报指标。冰雹潜势预报指标是在 08 时 0 ℃层高度小于 4.6 km、-20 ℃层高度小于 7.5 km、冻结层厚度小于 3.0 km、全总指数大于 46 ℃、杰弗逊指数大于 114.0 ℃、K 指数大于 21 ℃、沙氏指数小于 1.8℃。

（4）5 ~ 8 月在降雹前 15 min，雷达特征预警指标是回波顶高大于 12.2 km，与当日 0 ℃层高度差大于 7.7 km；40、45、50 dBZ 回波高度分别大于 9.4 km、8.6 km、7.8 km，与当日 0 ℃层高度差分别大于 4.9 km、4.0 km、3.4 km；组合反射率大于 53 dBZ，垂直累积液态水含量大于 13 kg · m^{-2}，逆风区厚度超过 1.8 km。在降雹前 30 min，雷达特征预警指标是回波顶高大于 12.3 km，与当日 0 ℃层高度差大于 7.8 km；40、45、50 dBZ 回波高度分别大于 9.6 km、8.1 km、7.3 km，与当日 0 ℃层高度差分别大于 5.1 km、3.5 km、2.7 km；组合反射率大于 47 dBZ，垂直累积液态水含量大于 7 kg · m^{-2}，逆风区厚度超过 1.5 km。

参考文献（References）

[1] 李斌，郑博华，史莲梅，等. 新疆阿克苏地区人工防雹作业效果研究[J]. 新疆农业科学，2016，53（5）：942 - 948. [LI Bin，ZHENG Bohua，SHI Lianmei，et al. Statistical evaluation of hail suppression effect in Akesu，Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural Sciences，2016，53（5）：942 - 948.]

[2] TOWERY N G，CHANGNON S A. Characteristics of hail-producing radar echoes in Illinois[J]. Monthly Weather Review，1970，98（5）：346 - 353.

[3] CANAVERO F G. Hailstorm discrimination by radar measurements[J]. Meteorology，1987，10（2）：184 - 190.

[4] DYE J E，MARTNER B E. The relationship between radar reflectivity factor and hail at the ground for northeast Colorado thunderstorms[J]. Journal of Applied Meteorology，1978，17（9）：1335 - 1341.

chinaXiv:201810.00150v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:201810.00150v1

[5] CICA R, BURCEA S, BOJARIUA R. Assessment of severe hailstorms and hail risk using weather radar data[J]. Meteorological Applications,2015,22(4):746－753.

[6] RIGO T, LLASAT M C. Forecasting hailfall using parameters for convective cells identified by radar[J]. Atmospheric Research, 2016,69:366－376.

[7] LOPEZ L, SANCHEZ J L. Discriminant methods for radar detection of hail[J]. Atmospheric Research,2009,93(1):358－368.

[8] SKRIPNIKOVA K, REZACOVAD. Radar-based hail detection[J]. Atmospheric Research,2014,144:175－185.

[9] PUSKEILER M, KUNZ M, SCHMIDBERGER M. Hail statistics for Germany derived from single-polarization radar data[J]. Atmospheric Research,2016,178－179:459－470.

[10] 刘君,肖秀珠,张维. 福建西部近 10 年冰雹雷达资料统计分析[J]. 气象科技,2013,41(2):339－342.[LIU Jun, XIAO Xiuzhu, ZHANG Wei. Analysis of hail radar data in recent 10 years over western Fujian[J]. Meteorological Science and Technology, 2013,41(2):339－342.]

[11] 王若升,张彤,樊晓春,等. 甘肃平凉地区冰雹天气的气候特征和雷达回波分析[J]. 干旱气象,2013,31(2):373－377.[WANG Ruosheng, ZHANG Tong, FAN Xiaochun, et al. Analysis of the climate features and radar echo of the hail weather in Pingliang of Gansu Province[J]. Journal of Arid Meteorology,2013,31(2):373－377.]

[12] 杨淑华,梁进秋,张玉芳,等. 冰雹天气的多普勒雷达特征统计分析[J]. 自然灾害学报,2014,23(3):101－106.[YANG Shuhua, LIANG Jinqiu, ZHANG Yufang, et al. Statistical characteristics analysis of Doppler radar of hail weathers[J]. Journal of Natural Disasters,2014,23(3):101－106.]

[13] 段鹤,严华生,马学文,等. 滇南冰雹的预报预警方法研究[J]. 气象,2014,40(2):174－185.[DUAN He, YAN Huasheng, MA Xuewen, et al. Study of the method for hail forecasting and warning in southern Yunnan[J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(2): 174－185.]

[14] 张正国,邹光源,刘丽君,等. 雷达回波顶高(ET)产品在广西冰雹云识别中的应用研究[J]. 气象研究与应用,2014,35(4):89－93.[ZHANG Zhengguo, ZOU Guangyuan, LIU Lijun, et al. Application of radar echotop (ET) products in the hail cloud recognition in Guangxi[J]. Journal of Meteorological Research and Application,2014,35(4):89－93.]

[15] 鲁德金,陈钟荣,袁野,等. 安徽地区春夏季冰雹云雷达回波特征分析[J]. 气象,2015,41(9):1104－1110.[LU Dejin, CHEN Zhongrong, YUAN Ye, et al. Analysis on radar echo characteristics of hail clouds in spring and summer of Anhui Province[J]. Meteorological Monthly,2015,41(9):1104－1110.]

[16] 李湘,张腾飞,胡娟,等. 云南冰雹灾害的多普勒雷达特征统计及预警指标[J]. 灾害学,2015,30(3):88－93.[LI Xiang, ZHANG Tengfei, HU Juan, et al. Doppler radar statistical characteristics and early warning index of Yunnan hail disaster[J]. Journal of Catastrophology,2015,30(3):88－93.]

[17] 支竣,陈春艳,毛炜峄. 新疆喀什西部新一代天气雷达产品的冰雹预警指标研究[J]. 冰川冻土,2014,36(1):95－105.[ZHI Jun, CHEN Chunyan, MAO Weiyi. Study of hailstone warning indexes of the new generation weather radar products in western Kashgar of Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2014, 36(1):95－105.]

[18] 王昀,谢向阳,马禹,等. 天山北侧成灾雹云移动路径及预警指标的研究[J]. 干旱区地理,2017,40(6):1152－1164.[WANG Yun, XIE Xiangyang, MA Yu, et al. Moving paths and nowcasting indicators of radar of hail cloud in northern Tianshan Mountains [J]. Arid Land Geography,2017,40(6):1152－1164.]

[19] 马禹,王旭,赵兵科,等. 新疆冰雹的时空统计特征[J]. 新疆气象,2002,25(1):4－5.[MA Yu, WANG Xu, ZHAO Bingke, et al. Spatial and temporal statistical character of hail in Xinjiang [J]. Xinjiang Meteorological Monthly,2002,25(1):4－5.]

[20] 贾俊平. 统计学[M]. 北京:清华大学出版社,2004:68－71.[JIA Junping. Statistics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004:68－71.]

[21] 赵清波,李莉. 利用原始资料计算百分位数的方法[J]. 中国卫生统计,1999,16(3):185.[ZHAO Qingbo, LI Li. Method of calculating percentiles using original data[J]. China Health Statistics,1999,16(3):185.]

[22] MILLER R C. Notes on analysis and severe-storm forecasting procedures of the air force global weather central, Technical report 200 (Rev.)[R]. Air Weather Service (MAC), United States Air Force. 190pp.

[23] JEFFERSON G J. A modified instability index[J]. Met Mag, 1963,92:92－96.

[24] JEFFERSON G J. A further development of the instability index [J]. Met Mag,1963,92:313－316.

[25] GEORGE J J. Weather Forecasting for Aeronautics[M]. New York and London: Academic Press,1960:673.

[26] SHOWALTER A K. A stability index for thunderstorms forecasting [J]. Bull Amer Meteor Soc,1953,34:250－252.

[27] MONCRIEFF M W, MILLER M J. The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines[J]. The Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,1976,102(432):373－394.

[28] BLANCHARD D O. Assessing the vertical distribution of convective available potential energy[J]. Weather and Forecasting,1998, 13(3):870－877.

[29] 雷雨顺,吴宝俊,吴正华. 冰雹概论[M]. 北京:科学出版社, 1978:41－42.[LEI Yushun, WU Baojun, WU Zhenghua. The conspectus of hailstone[M]. Beijing: Science Press,1978:41－42.]

[30] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社, 2001:388－463.[ZHANG Peichang, DU Bingyu, DAI Tiepi. Radar meteorology[M]. Beijing: Meteorological Press, 2001: 388－463.]

[31] 夏文梅,张亚萍,汤达章,等. 暴雨多普勒天气雷达资料的分析[J]. 南京气象学院学报,2002,25(6):787－794.[XIA Wenmei, ZHANG Yaping, TANG Dazhang, et al. Analysis of Doppler weather radar measurements on rain gush[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology,2002,25(6):787－794.]

[32] 李军霞,汤达章,李培仁,等. 中小尺度的多普勒径向速度场特征分析[J]. 气象科学,2007,27(5):557－563.[LI Junxia, TANG Dazhang, LI Peiren, et al. Analysis of meso and small scale Doppler velocity features[J]. Scientia Meteorologica Sinica,2007, 27(5):557－563.]

[33] 陈鲍发,魏鸣,柳守煜. 逆风区的回波演变与强对流天气的结

ChinaXiv合作期刊

构分析[J]. 暴雨灾害,2008,27(2):127－134.[CHEN Baofa, WEI Ming, LIU Shouyu. The echo evolution of adverse wind area and the structure of the strong convection weather[J]. Torrential Rain and Disasters,2008,27(2):127－134.]

[34] 冯晋勤,童以长,罗小金. 一次中－β尺度局地大暴雨对流系统的雷达回波特征[J]. 气象,2008,34(10):50－54.[FENG Jinqin, TONG Yichang, LUO Xiaojin. CINRAD radar echo features of a mesoscale-β local heavy rainfall convective system[J]. Meteorological Monthly,2008,34(10):50－54.]

[35] 梁红,陈立德,李大为,等. 沈阳一次局地大暴雨过程中逆风区的回波演变[J]. 气象与环境学报,2011,27(3):12－17.[LIANG Hong, CHEN Lide, LI Dawei, et al. Radar echo evolution of adverse wind area in a local heavy rain process in Shenyang, Liaoning Province[J]. Journal of Meteorology and Environment,2011,27(3):12－17.]

[36] 方标. 2015年春末梵净山东侧特大暴雨雷达径向速度特征[J]. 干旱气象,2016,34(6):1064－1070.[FANG Biao. Analysis of radial velocity features of Doppler radar on a torrential rainstorm in eastern Fanjing Mountain in late spring of 2015[J]. Journal of Arid Meteorology,2016,34(6):1064－1070.]

Nowcasting indicators of radar of hail cloud in southern Tianshan Mountains

WANG Yun[1], LU Pin-rui[2], WANG Xu[3]

(1 *College of Atmospheric Sciences of Lanzhou University, Lanzhou* 730001, *Gansu, China*; 2 *Zhangye Meteorological Bureau, Zhangye* 734002, *Gansu, China*; 3 *Xinjiang Weather Modification Office, Urumqi* 830002, *Xinjiang, China*)

Abstract: In this paper, the variation characteristics of hail stone in the range of May to August from 2008 to 2017 were analyzed by using the observation records of Kashi meteorological stations on the south side of Tianshan Mountains, Xinjiang, China, the records of artificial hailing, Kashi sounding data at 08:00 AM and 20:00 PM and detection data of radars. The radar echo characteristics and the moving path of the hail cloud were studied and forecast index and radar warning index of the hail cloud are determined based on the percentile method. The results showed as follows: (1) Hail stone appeared on the south side of the Tianshan Mountains in the past 10 years, concentrated on the period from May to August and most appear in Jun, especially at 18:00～24:00 PM and most at 20:00 PM. (2) The four migration paths of hail cloud were northwest, north, west and southerly. One half of hail cloud origin in the southern Tianshan Mountainous Area, and the other half originated in the plain area in eastern Kashi Prefecture. (3) The potential forecasting index of hail in the range of May to August is 0 ℃ layer height difference smaller than 4.6 km, －20 ℃ layer height difference smaller than 7.5 km, freezing layer thickness is less than 3.0 km, General index is bigger than 46 ℃, Jefferson index is bigger than 114.0 ℃, *K* index is bigger than 21 ℃ and *SI* index is smaller than 1.8 ℃ at 08:00 AM. (4) The Radar warning indexes of hail cloud in the range of May-August before hail 15 min are as follows: The echo top height is bigger than 12.2 km, and the 0 ℃ height difference is bigger than 7.7 km. The 40, 45, 50 dBZ echo heights are greater than 9.4, 8.6, 7.8 km respectively and the 0 ℃ layer height difference is bigger than 4.9, 4.0, 3.4 km. In addition, combined reflectivity is bigger than 53 dBZ, vertical cumulative liquid water content is bigger than 13 kg·m^{-2}, and thickness of upwind zone in the radial wind field is exceeds 1.8 km. The Radar warning indexes of hail in the range of May-August before hail 30 min are as follows: the echo top height is bigger than 12.3 km, 0 ℃ layer height difference bigger than 7.8 km. The 40, 45, 50 dBZ echo heights are greater than 9.6, 8.1, 7.3 km respectively and the 0 ℃ layer height difference is bigger than 5.1, 3.5, 2.7 km. Moreover, the combined reflectance is greater than 47 dBZ, vertical cumulative liquid water content is greater than 7 kg·m^{-2}, and thickness of upwind zone in the radial wind field is exceeds 1.5 km.

Key words: echo tops (*ET*); vert integrated liquid (*VIL*); composite reflectance (*CR*); moving path; nowcasting indicators

chinaXiv:201810.00150v1